

## طراحی آستانه فازی تطبیقی جهت جداسازی هوشمند خطاها در توربین های بادی

ناصر طالبی<sup>۱\*</sup> و محسن علیزاده<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸	توربین های بادی در معرض وقوع انواع خطاها قرار دارند که تعدادی از آنها می توانند خسارات اقتصادی جبران ناپذیری را به همراه داشته باشند. از این رو شناسایی خطاهای به وقوع پیوسته در زمان کوتاه، عملکرد صحیح سیستم را تضمین و از این خسارات جلوگیری می نماید. در این مقاله، ابتدا به کمک یک مدل دینامیکی جامع برای توربین های بادی که قسمت های مکانیکی و الکتریکی را با جزئیات مناسبی شامل می شود، سیستم تشخیص و جداسازی خطای هوشمند با استفاده از شبکه های عصبی بازگشتی طراحی می شود که توسط آن می توان خطاهای به وقوع پیوسته در سنسورها و محرک های فراز را تشخیص داد. سپس جهت مقاوم سازی طرح ارائه شده، بکارگیری سطح آستانه فازی تطبیقی در بلوک ارزیابی مانده پیشنهاد می گردد. مقایسه نتایج شبیه سازی برای سطوح آستانه ثابت، مقاوم و فازی تطبیقی نشان دهنده آن است که استفاده از سطح آستانه پیشنهادی موجب کاهش زمان تشخیص، تعداد هشدارهای اشتباه و تعداد هشدارهای از دست رفته می شود.
<b>واژگان کلیدی:</b> توربین بادی، مدل سازی دینامیکی، سیستم تشخیص و جداسازی خطا، شبکه های عصبی بازگشتی، سطح آستانه فازی تطبیقی.	

### ۱- مقدمه

در حال حاضر، به دلیل نگرانی از وابستگی اقتصاد جهانی به انرژی های فسیلی و نیز به دلیل مسائل زیست محیطی، توجه روزافزونی به منابع انرژی الکتریکی ثانویه می شود. در میان منابع متنوعی که در بازار انرژی وجود دارد، انرژی بادی یکی از منابع امیدبخش می باشد. باد یک منبع پاک و پایان ناپذیر است که در سراسر زمین می توان از آن بهره برداری نمود [۱]. توربین های بادی با ظرفیت خروجی بالا، در محدوده ۱۰۰ کیلو وات الی ۵ مگا وات، به منظور فراهم کردن انرژی برای ۱۰ الی ۵۰۰ خانه کافی می باشند. از طرف دیگر از توربین های بادی با ظرفیت بالاتر می توان در کاربردهای صنعتی استفاده نمود [۲].

برای بررسی عملکرد توربین های بادی تحت شرایط عملکرد مختلف، نیاز است که از یک مدل دقیق استفاده شود. در

برخی از مدل هایی که تاکنون توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته اند، از مدل سازی بخش های مکانیکی صرف نظر شده است و در برخی دیگر مدل سازی قسمت های الکتریکی مد نظر قرار نگرفته است. در تعداد محدودی از آنها نیز مدل کامل توربین بادی مورد استفاده قرار گرفته شده است. جهت بررسی و آنالیز نحوه انتشار خطا<sup>۳</sup> و اثرگذاری آن در نقاط مختلف توربین بادی به مدلی نیاز است که هم بخش های الکتریکی و هم بخش های مکانیکی را تا حد مناسبی پوشش دهد، که با استفاده از این مدل بتوان اثر خطاها را در نقاط مختلف سیستم مشاهده کرد و به بررسی و شناسایی آنها پرداخت. از این رو در این تحقیق از مدل دینامیکی ارائه شده در مرجع [۳] بهره گرفته شد.

از سوی دیگر، یکی از ویژگی های بسیار مهم برای هر طرح قابلیت اطمینان آن می باشد که این امر را می توان با از بین

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: n.talebi@live.com

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

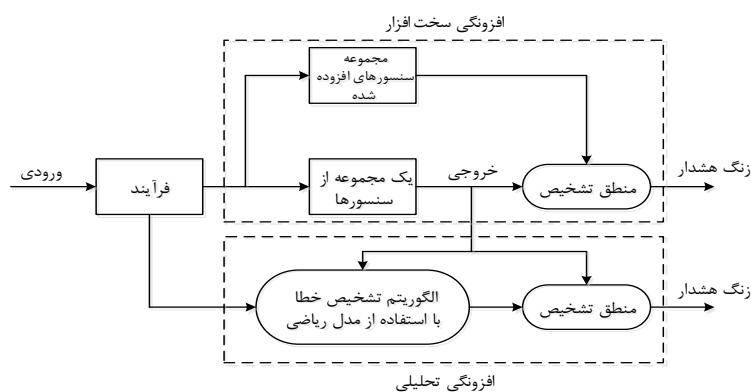
۳. در منابع فارسی از واژه «عیب» نیز به عنوان معنای لغت Fault بهره گرفته می شود.

دارد، دو ساختار قابل توجه، ساختارهای پیش‌خورد و بازگشتی هستند.

در سال‌های اخیر تشخیص و جداسازی خطاهای به وقوع پیوسته در توربین بادی توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال در [۶] با استفاده از مدل خطی قسمت‌های مکانیکی توربین بادی (از قسمت‌های الکتریکی صرف‌نظر شده است)، کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا با استفاده از روش کنترل پارامتر-متغیر خطی ارائه شده است. در این تحقیق، خطاهای به وقوع پیوسته تشخیص داده شده و سپس تغییر ساختار کنترل‌کننده انجام می‌پذیرد. در [۷] تشخیص خطای سنسور فراز توربین بادی توسط فیلتر کالمن صورت می‌پذیرد. در [۸] با استفاده از راهکار تعلق-مجموعه و مدل قسمت‌های مکانیکی خطاهای سیستم فراز تشخیص داده شده‌اند. در [۹] نیز با استفاده از مدل قسمت‌های مکانیکی، فیلتر کالمن و سطح آستانه بر مبنای شمارنده دوجہته، خطاهای قسمت‌های مختلف شناسایی شده‌اند. در [۱۰] نیز از مدل خطی قسمت‌های مکانیکی برای تشخیص دو دسته خطا در محرک فراز با استفاده از فیلتر کالمن، استفاده شده است. در [۱۱] با استفاده از روش داده کاوی خطاهای یاتاقان توربین بادی شناسایی شده‌اند. محققان در مرجع [۱۲] با استفاده از مدل سازی فازی یک سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا در هنگام وقوع خطا در ژنراتور ارائه نموده‌اند. در [۱۳] با استفاده از مدل قسمت‌های مکانیکی توربین بادی و روش الهام گرفته شده از سیستم ایمنی بدن انسان، خطاهای موجود در پره و سنسور فراز تشخیص داده شده‌اند. در [۱۴] با استفاده از اطلاعات عملی از سیستم مانیتورینگ شرایط، خطاهای مربوط به سیستم ترمز هیدرولیکی توربین بادی شناسایی شده‌اند.

بردن نقاط ضعف و نیز خطاهای به وقوع پیوسته قبلی تضمین نمود. یکی از روش‌های متداول جهت دستیابی به قابلیت اطمینان، پیاده‌سازی سیستم‌های تشخیص و جداسازی خطا می‌باشد. اخیراً مسئله تشخیص خطا برای کاربردهای صنعتی، یعنی در کاربردهایی که جان افراد در معرض خطر نیست، از اهمیت بالایی برخوردار شده است. در این گونه سیستم‌ها مسائل اقتصادی و رضایت کاربران مهم است. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به ماشین‌های الکتریکی [۴]، سیستم‌های قدرت [۵]، سیستم‌های تهویه ساختمان، سیستم‌های حمل و نقل، اتومبیل‌ها و توربین‌های بادی [۶-۲۴] اشاره نمود.

به طور کلی روش‌های تشخیص خطا را می‌توان به دو دسته افزونگی سخت‌افزار و افزونگی تحلیلی تقسیم‌بندی نمود. راه‌کار اصلی در افزونگی سخت‌افزار مقایسه سیگنال‌هایی است که توسط سخت‌افزارهای مختلف تولید شده است، از قبیل اندازه‌گیری یک سیگنال توسط دو و یا چند سنسور. از طرف دیگر افزونگی تحلیلی از مدل ریاضی سیستم به همراه برخی تکنیک‌های تخمین برای تشخیص خطا استفاده می‌کند. از آنجائی که افزونگی تحلیلی نیازی به سخت‌افزار اضافه ندارد، معمولاً این روش نسبت به افزونگی سخت‌افزار هزینه کمتری را در پی خواهد داشت. در شکل (۱) روش‌های افزونگی سخت‌افزار و افزونگی تحلیلی نشان داده شده‌اند [۲۵]. شبکه‌های عصبی طی دو دهه گذشته به صورت موفقیت‌آمیزی برای مدل‌سازی، پیش‌بینی رفتار و کنترل سیستم‌های دینامیکی استفاده شده‌اند [۲۶]. همچنین از آن‌ها در ساختار سیستم‌های تشخیص خطا نیز بهره گرفته شده است [۲۷]. شبکه‌های عصبی ابزار ریاضی خوبی را برای مقابله با مسائل غیرخطی فراهم می‌کنند. از میان ساختارهای فراوانی که برای شبکه‌های عصبی وجود



شکل ۱- نمایش افزونگی تحلیلی و افزونگی سخت‌افزار.

تشخیص و جداسازی خطاهای سنسور و محرک فراز را دارد. طرح ارائه شده از شبکه‌های عصبی دینامیکی بهره می‌گیرد. به منظور انتخاب نوع و ساختار شبکه عصبی دینامیکی مناسب جهت مدل‌سازی رفتار توربین بادی در شرایط عملکرد نرمال، سه معیار در نظر گرفته می‌شود و از بین ساختارهای مختلف، یک طرح انتخاب می‌شود. جهت مقاوم‌سازی بلوک ارزیابی مانده و نیز جهت جداسازی مؤثر خطاهای سیستم فراز استفاده از سطح آستانه تطبیقی فازی پیشنهاد می‌شود. در واقع بخش نوآورانه ساختار پیشنهادی، ارائه روشی جدید و کارآمد جهت ارزیابی تطبیقی سیگنال‌های مانده در بلوک ارزیابی مانده می‌باشد. ارزیابی سیگنال‌های مانده در طراحی با توجه به قابلیت‌ها و ویژگی‌های مطلوب سیستم‌های فازی صورت می‌پذیرد که بهره‌گیری از این سیستم‌ها در بلوک تصمیم‌گیری می‌تواند به نحو موثری باعث کاهش تعداد هشدارهای اشتباه و افزایش حساسیت گردد.

بدین منظور سیگنال‌های مانده، میانگین مانده و مانده گذرانده شده از فیلتر پائین‌گذر به عنوان ورودی‌های پیشنهادی سیستم فازی و سیگنال‌های مشخص‌کننده نوع خطای به وقوع پیوسته به عنوان خروجی سیستم فازی انتخاب می‌گردند. انتخاب نوع سیگنال‌های ورودی و تعداد آن‌ها و نیز نوع سیستم فازی (منظور انتخاب نوع موتور استنتاج، توابع تعلق ورودی، پایگاه قواعد، توابع تعلق خروجی، فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز می‌باشد) از اهداف طراحی آستانه فازی تطبیقی می‌باشند. در نهایت نشان داده خواهد شد که سطح آستانه پیشنهادی در مقایسه با سطوح آستانه ثابت و مقاوم عملکرد بهتری دارد و تعداد هشدارهای اشتباه و از دست رفته را کاهش می‌دهد.

ترتیب بخش‌های بعدی مقاله به شرح زیر می‌باشد: در بخش ۲ مدل دینامیکی توربین بادی تشریح می‌گردد. ساختار شبکه‌های عصبی بازگشتی مورد استفاده در این تحقیق در بخش ۳ بررسی می‌شود. در بخش ۴ سیستم تشخیص و جداسازی خطای هوشمند طراحی می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی تحلیل می‌شوند. بخش ۵ مقاله نیز به مقایسه عملکرد طرح پیشنهادی با دو روش دیگر می‌پردازد.

## ۲- مدل دینامیکی توربین بادی

به طور معمول جهت مدل‌سازی توربین بادی آن را به زیر سیستم‌های مجزا از هم تقسیم می‌نمایند و سپس برای هر یک از قسمت‌ها مدل ریاضی را به دست می‌آورند.

مرجع [۱۵] نیز به بررسی وقوع خطا در ژنراتور و تشخیص آن با استفاده از شبکه‌های عصبی آموزش عمیق می‌پردازد. در [۱۶] با استفاده از روش محاسبات ابری خطاهای موجود در یاتاقان و جعبه دنده شناسایی شده‌اند. در [۱۷] تشخیص و جداسازی خطا در جعبه دنده توسط ترکیب روش طیف مورب و ماشین بردار پشتیبان انجام شده است. در مرجع [۱۸] شناسایی چند نوع خطا با استفاده از الگوریتم نمونه‌برداری گیبس، خوشه‌بندی فازی و شبکه‌های بیزی صورت پذیرفته است. مرجع [۱۹] به تشخیص خطاهای توربین بادی با استفاده از روش تجزیه و تحلیل بافت تصویر می‌پردازد. در مقاله [۲۰] با استفاده از اطلاعات عملی از سیستم اسکادا و خوشه‌بندی توسط ماشین بردار پشتیبان خطاهای یاتاقان و جعبه دنده شناسایی شده‌اند. مقاله [۲۱] به ارائه یک سیستم تشخیص خطا مبتنی بر شبکه‌های عصبی بازگشتی جهت تشخیص خطاهای یاتاقان و جعبه دنده می‌پردازد. در مقاله [۲۲] از شبکه‌های عصبی جهت تشخیص و جداسازی خطا در فازهای A، B و C بهره گرفته شده است. همچنین از شبکه‌های عصبی و منطق فازی جهت شناسایی خطای سیستم فراز در مقاله [۲۳] استفاده شده است. مرجع [۲۴] نیز به ارائه سیستم تشخیص خطا بر مبنای شبکه‌های عصبی آموزش عمیق جهت تشخیص خطای پره‌های توربین بادی می‌پردازد. نتیجه مقایسه پژوهش‌های بررسی شده در این بخش با مقاله حال حاضر در جدول ۱ گردآوری شده است.

با توجه به جدول ۱ در خصوص مقالات این حوزه می‌توان موارد به شرح ذیل را بیان نمود:

- در برخی از پژوهش‌ها مدل‌سازی توربین بادی به طور کامل انجام نگرفته است و یا از مدل خطی توربین بادی برای طراحی سیستم تشخیص خطا استفاده شده است.
- در برخی از مقالات تنها بحث تشخیص خطا مورد توجه قرار گرفته شده است و از جداسازی خطاها صرف‌نظر شده است.
- در تعداد قابل توجهی از مقالات مقاوم‌سازی سیستم تشخیص خطا در بلوک ارزیابی مانده مد نظر قرار نگرفته است.

در این تحقیق با استفاده از مدل کامل و غیرخطی توربین بادی (شامل قسمت‌های الکتریکی و مکانیکی)، سیستم تشخیص و جداسازی خطایی طراحی می‌شود که قابلیت

جدول ۱- مقایسه پژوهش‌های انجام شده با مقاله حال حاضر.

ردیف	مقاله	سال انتشار	مدل توربین بادی	محل وقوع خطا	روش تشخیص و جداسازی خطا
۱	[۶]	۲۰۱۲	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	سیستم فراز	پارامتر-متغیر خطی (از نوع فعال)
۲	[۷]	۲۰۱۰	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	سنسور فراز	فیلتر کالمن+سطح آستانه ساده
۳	[۸]	۲۰۱۲	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	سیستم فراز	راهکار تعلق-مجموعه (از نوع فعال)
۴	[۹]	۲۰۱۱	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور+سیستم فراز	فیلتر کالمن+سطح آستانه بر مبنای شمارنده دووجهته (بالا-پائین)
۵	[۱۰]	۲۰۰۲	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	محرك فراز	فیلتر کالمن+سطح آستانه ساده
۶	[۱۱]	۲۰۱۲	کامل	یاتاقان	داده کاوی+سطح آستانه ساده
۷	[۱۲]	۲۰۱۵	صرفنظر از تعدادی از قسمت‌های الکتریکی	ژنراتور	مدل سازی فازی+سطح آستانه ساده
۸	[۱۳]	۲۰۱۷	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	پره+سنسور فراز	روش الهام گرفته شده از سیستم ایمنی بدن انسان+سطح آستانه ساده
۹	[۱۴]	۲۰۱۲	صرفنظر از تعدادی از قسمت‌های مکانیکی	سیستم ترمز هیدرولیکی	مقایسه اطلاعات عملی از سیستم مانیتورینگ شرایط و مدل+سطح آستانه ساده
۱۰	[۱۵]	۲۰۱۸	کامل	ژنراتور	شبکه‌های عصبی آموزش عمیق+سطح آستانه مقاوم
۱۱	[۱۶]	۲۰۱۹	کامل	یاتاقان+جعبه دنده	محاسبات ابری+سطح آستانه ساده
۱۲	[۱۷]	۲۰۱۳	کامل	جعبه دنده	طیف مورب+ ماشین بردار پشتیبان
۱۳	[۱۸]	۲۰۱۶	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور+سیستم فراز	الگوریتم نمونه برداری گیبس و خوشه‌بندی فازی+شبکه‌های بی‌زی
۱۴	[۱۹]	۲۰۱۸	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور+سیستم فراز	تجزیه و تحلیل بافت تصویر+جداسازی توسط الگوریتم KNN
۱۵	[۲۰]	۲۰۲۱	کامل	یاتاقان+جعبه دنده	استفاده از اطلاعات عملی از سیستم اسکادا و خوشه‌بندی توسط ماشین بردار پشتیبان+سطح آستانه مقاوم
۱۶	[۲۱]	۲۰۲۱	کامل	یاتاقان+جعبه دنده	شبکه‌های عصبی بازگشتی+سطح آستانه ساده
۱۷	[۲۲]	۲۰۱۹	صرفنظر از تعدادی از قسمت‌های مکانیکی	خطا در فازهای A, B و C	شبکه‌های عصبی+جداسازی توسط شبکه‌های عصبی
۱۸	[۲۳]	۲۰۲۱	خطی+صرفنظر از قسمت‌های الکتریکی	سیستم فراز	شبکه‌های عصبی و منطق فازی+سطح آستانه ساده
۱۹	[۲۴]	۲۰۲۰	کامل	پره	شبکه‌های عصبی آموزش عمیق+سطح آستانه متغیر
۲۰	تحقیق حال حاضر		کامل	سیستم فراز	شبکه‌های عصبی بازگشتی+سطح آستانه تطبیقی فازی

اختلاف سرعت شاسی،  $\dot{x}_r(t)$  و سرعت باد به دست می‌آید. همچنین گشتاور ایرودینامیکی روتور،  $T_r(t)$ ، از طریق بخش درایو به ژنراتور منتقل می‌شود. بخش درایو شامل محورهای سرعت بالا و سرعت پائین و نیز جعبه دنده

مدلی که در این تحقیق از آن بهره گرفته شد در شکل (۲) نشان داده شده است [۳]. در این مدل از مکانیسم تنظیم زاویه توربین صرفنظر شده است. به دلیل آن که برج توربین در نوسان می‌باشد، سرعت باد موثر در روتور،  $v_r(t)$ ، از

مدل سازی می شود [۳]. نیروی رانش باعث می شود که برج به جلو و عقب در نوسان باشد. برج با یک سیستم جرم-فنر-دمپر طبق رابطه (۴) مدل می شود. نوسان برج بر روی سرعت باد مؤثر دیده شده از روتور تأثیر می گذارد. سرعت باد مؤثر با استفاده از رابطه (۵) مدل می شود.

$$M_r \ddot{x}_r(t) = F_{th}(t) - B_r \dot{x}_r(t) - K_r x_r(t) \quad (4)$$

$$v_r(t) = v_w(t) - \dot{x}_r(t) \quad (5)$$

سیستم فراز، یک سیستم هیدرولیک است. محرک فراز توسط معادله (۶) مدل می شود، که در این معادله،  $\beta(t)$  زاویه فراز،  $\beta_{ref}(t)$  زاویه فراز مرجع،  $\omega_n$  فرکانس طبیعی میرا نشده مدل محرک فراز و  $\zeta$  نسبت میرائی مدل محرک فراز می باشند.

$$\ddot{\beta}(t) = -2\zeta\omega_n\dot{\beta}(t) - \omega_n^2\beta(t) + \omega_n^2\beta_{ref}(t) \quad (6)$$

قسمت های الکتریکی ماشین القایی توسط چهار معادله دیفرانسیل برای معادلات ولتاژ استاتور و روتور در دستگاه مرجع سنکرون بیان می شوند و قسمت های مکانیکی ماشین القایی توسط دو معادله قابل توصیف هستند. همچنین چهار معادله برای مدل سازی مبدل سمت شبکه و خازن لینک  $dc$  استفاده می شوند. مدل کامل توربین بادی به همراه مقدار پارامترهای سیستم از مرجع [۳] قابل دسترسی می باشد. توربین بادی دارای سه دسته کنترل کننده است: کنترل کننده  $RSC$ ، کنترل کننده  $GSC$  و کنترل کننده فراز. برای کنترل  $RSC$  و  $GSC$  از کنترل کننده های  $PI$  طبق آنچه در [۳] آورده شده است، استفاده شد. کنترل کننده فراز نیز با استفاده از یک کنترل کننده  $PI$  قابل پیاده سازی است که بر روی خطای سرعت ژنراتور عمل می کند [۳].

### ۳- شبکه های عصبی بازگشتی

شبکه های عصبی مصنوعی طی دو دهه گذشته به صورت موفقیت آمیزی برای مدل سازی و کنترل سیستم های دینامیکی و در ساختار سیستم های تشخیص خطا استفاده شده اند [۲۷]. برای به کارگیری شبکه های عصبی در مدل سازی یا تشخیص خطای سیستم ها باید دینامیک فرآیندها و سیستم های مورد مطالعه را نیز لحاظ نمود. برای آن که یک شبکه عصبی دینامیک باشد، باید دارای حافظه باشد. یک راه ساده برای قرار دادن حافظه در ساختار شبکه عصبی، استفاده از تأخیرهای زمانی است.

می باشد. ژنراتور القایی انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و به شبکه قدرت متصل می شود. از یک رابط جهت انجام محاسبات توان های اکتیو و راکتیو تولید شده توسط ژنراتور استفاده می شود. مدل شبکه نیز شامل بار محلی، ترانسفورماتور، خط انتقال و در نهایت شین بی نهایت می باشد. همچنین در این طرح مبدل ها، لینک جریان مستقیم، کنترل کننده های مبدل سمت روتور و مبدل سمت شبکه نیز مدل سازی می شوند.

در شکل (۲) مدل باد شامل اثر برج، جریان هوای گردابی و انحراف ناگهانی مسیر باد می باشد. قابلیت توربین بادی برای استخراج توان موجود در باد و انتقال آن به سمت محور روتور توسط قسمت های ایرودینامیکی مدل می شود. توان قابل استخراج از بادی که از طریق تمام سطح روتور می گذرد توسط رابطه زیر بیان می شود [۳]:

$$P_w(t) = 0.5\rho Av_r^3(t) = 0.5\rho\pi R^2 v_r^3(t) \quad (1)$$

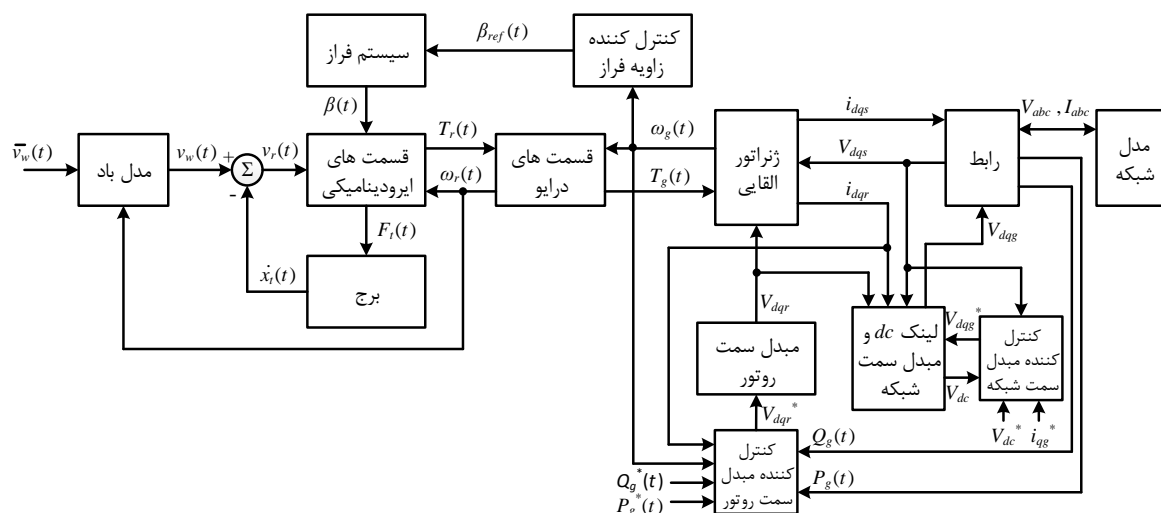
که در رابطه فوق  $P_w$  توان قابل استفاده از باد بر حسب وات،  $A$  سطح روتور بر حسب متر مربع،  $R$  شعاع روتور،  $v_r$  سرعت باد مؤثر بر روی روتور بر حسب متر بر ثانیه و  $\rho$  چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می باشند. میزان توان حاصل شده نسبت به توان قابل استخراج از باد، توسط ضریب توان توربین،  $C_p$ ، بیان می شود. بنابراین توان حاصل شده از باد را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P_r(t) = 0.5\rho Av_r^3(t) C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (2)$$

که در روابط فوق  $P_r(t)$  توان دریافت شده توسط روتور توربین،  $\beta(t)$  زاویه فراز و  $\lambda(t)$  نرخ سرعت نوک پره است. نیروی رانش ایرودینامیکی که از تداخل بین پرها و باد حاصل می شود، از طریق پرها به شاسی و برج منتقل می شود و توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F_r(t) = 0.5\rho Av_r^2(t) C_t(\lambda(t), \beta(t)) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $C_t(\lambda(t), \beta(t))$  ضریب رانش می باشد. دو منحنی  $C_p(\lambda(t), \beta(t))$  و  $C_t(\lambda(t), \beta(t))$  به صورت جدول جستجو در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته شدند. گشتاور ایرودینامیکی توسط بخش درایو به گشتاور اعمالی به ژنراتور تبدیل می شود. چرخ دنده سرعت چرخشی را به سرعت مورد نیاز توسط ضریب چرخ دنده تبدیل می کند. بخش درایو توسط سه معادله دیفرانسیل

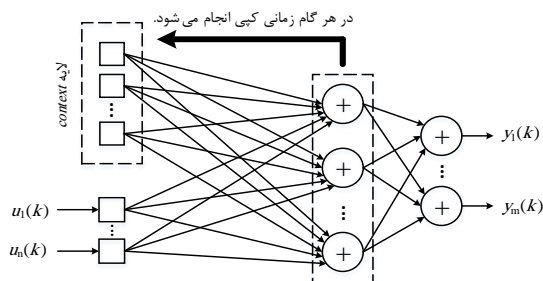


شکل ۲- ارتباط بین زیرسیستم‌های توربین بادی [۳].

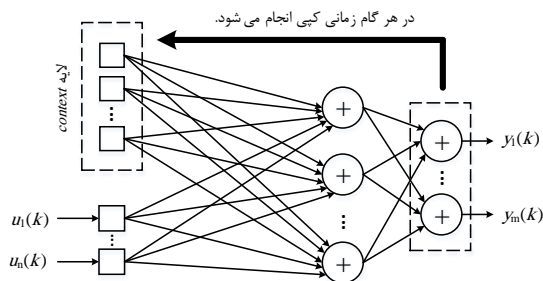
$$\varphi(k) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(k) + \sum_{i=1}^r d_i \varphi(k-i) \quad (7)$$

$$y(k) = \sigma(\varphi(k)) \quad (8)$$

که در روابط فوق  $u_i, i=1, \dots, n$  ورودی‌های نرون،  $w_i$  وزن‌های ورودی،  $\varphi(k)$  پتانسیل فعال‌سازی،  $d_i, i=1, \dots, r$  ضرایبی که شدت فیدبک  $\varphi(k-i)$  را مشخص می‌کنند و  $\sigma(\cdot)$  تابع فعال‌ساز غیرخطی هستند.



شکل ۳- ساختار شبکه بازگشتی المان.



شکل ۴- ساختار شبکه بازگشتی جردن.

با توجه به شکل (۵) ورودی به نرون می‌تواند ترکیبی از متغیرهای ورودی و نسخه‌های تأخیر یافته فعال‌ساز  $\varphi(k)$  باشد. توجه شود که بخش انتهایی رابطه (۷) را می‌توان به

راه حل دیگر، بهره‌گیری از فیدبک می‌باشد. دو روش اصلی برای در نظر گرفتن فیدبک در شبکه عصبی وجود دارد: فیدبک محلی در سطح تک نرون داخل شبکه و فیدبک سراسری که تمامی شبکه را شامل می‌شود. شبکه‌های عصبی با یک یا چند فیدبک، شبکه‌های عصبی بازگشتی نامیده می‌شوند. به طور کلی دو روش برای مدل کردن سیستم‌های دینامیکی توسط شبکه‌های عصبی وجود دارد: استفاده از شبکه‌های عصبی با دینامیک‌های خارجی و استفاده از شبکه‌های عصبی با دینامیک داخلی. در زیر بخش‌های بعدی مختصراً این شبکه‌های دینامیکی بررسی می‌شوند.

### ۳-۱- شبکه‌های بازگشتی جزئی

این شبکه‌ها ساختاری مشابه شبکه پرسپترون چند لایه دارند، با این تفاوت که یک لایه به نام لایه زمینه به ساختار شبکه اضافه می‌شود. نرون‌های این لایه به عنوان حالت‌های داخلی مدل به کار گرفته می‌شوند. از بین طرح‌های فراوان ارائه شده، دو شبکه بازگشتی جزئی مهم، شبکه‌های با ساختار المان و جردن می‌باشند. تحقق چنین شبکه‌هایی به طرز قابل توجهی ارزان‌تر از شبکه‌های پرسپترون چند لایه با خطوط تأخیر زمانی است. ساختار المان در شکل (۳) و ساختار جردن در شکل (۴) نشان داده شده است. ساختار المان شامل چهار لایه می‌باشد: لایه ورودی با  $n$  واحد، لایه زمینه با  $v$  واحد، لایه مخفی با  $v$  واحد و لایه خروجی با  $m$  واحد.

### ۳-۲- مدل نرون با فیدبک سیناپسی محلی

این مدل با معادلات زیر توصیف می‌شود [۲۸]:

که در رابطه فوق  $\varphi(k)$  ورودی فیلتر و  $z(k)$  خروجی آن است. در نهایت خروجی نرون توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$y(k) = \sigma(g_2(z(k) - g_1)) \quad (11)$$

که در رابطه فوق  $\sigma(\cdot)$  تابع فعال‌ساز غیرخطی است که خروجی  $y(k)$  نرون را تولید می‌کند و نیز  $g_1$  و  $g_2$  پارامترهای بایاس و شیب تابع فعال‌ساز هستند.

برای آموزش این نوع از شبکه‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد؛ که سه روش مهم، روش‌های پس‌انتشار دینامیکی توسعه یافته<sup>۲</sup>، جستجوی تصادفی تطبیقی<sup>۴</sup> و تخمین اتفاقی آشفستگی همزمان<sup>۵</sup> می‌باشند. در این تحقیق از روش *ARS* برای آموزش این شبکه استفاده شد. مزیت این روش در آن است که به آسانی قابل پیاده‌سازی است، دارای پهنه کاربرد بسیار وسیعی است و روند آموزش در آن نیازی به محاسبه عبارات گرادیان ندارد. اطلاعات مورد نیاز برای پیاده‌سازی این روش تنها اطلاعات ورودی-خروجی هستند که در آن بردار پارامترهای  $\theta$  ورودی و تابع هزینه  $J(\theta)$  خروجی هستند. الگوریتم *ARS* دارای خاصیت همگرایی سراسری است [۲۷].

#### ۴- طراحی و شبیه‌سازی سیستم تشخیص و جداسازی هوشمند خطا

در طراحی سیستم تشخیص خطا، با بررسی سیگنال خروجی سنسورهای فراز، می‌توان خطاهای سنسورها و محرک‌های فراز را شناسایی نمود. با توجه به مدل‌سازی انجام شده برای توربین بادی، سیگنال مذکور را می‌توان به عنوان یک تابع غیرخطی از سرعت زاویه‌ای روتور توربین،  $\omega_r$  و سرعت باد اندازه‌گیری شده در نظر گرفت. پس می‌توان رابطه زیر را نوشت:

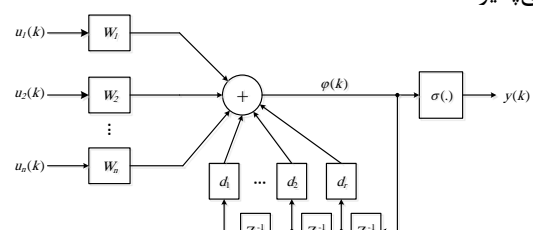
$$\beta_{1,2,3} = h(V_w, \omega_r) \quad (12)$$

که در رابطه فوق  $h(\cdot)$  یک تابع غیرخطی می‌باشد. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده در ورودی این تابع، می‌توان خروجی آن را توسط شبکه‌های عصبی بازگشتی مذکور در بخش قبل، تخمین زد. برای آموزش شبکه‌های عصبی بازگشتی جهت مدل‌سازی خروجی سنسور فراز پره ۱، داده‌های آموزشی با تعداد ۱۰۰۰ نمونه در هر دسته مورد

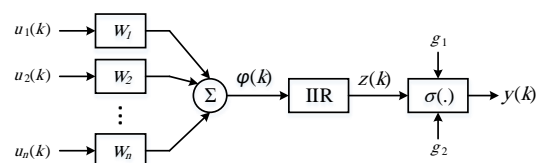
عنوان فیلتر پاسخ ضربه محدود<sup>۱</sup> تفسیر کرد. این مدل دارای سیگنال‌های فیدبکی است که از قبل از بلوک فعال‌ساز غیرخطی گرفته شده‌اند.

#### ۳-۳- مدل نرون با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود

در این مدل دینامیک‌ها توسط اعمال یک فیلتر پاسخ ضربه نامحدود<sup>۲</sup> به ساختار نرون ایجاد می‌شوند. در این حالت نرون ورودی‌ها و برانگیختگی‌های قبلی خودش را توسط دو سیگنال بازتولید می‌کند: ورودی  $u_i(k), i=1, \dots, n$  و خروجی  $y(k)$ . شکل (۶) ساختار مدل نرون مورد نظر را نشان می‌دهد. سه عمل مهم در این ساختار دینامیکی انجام می‌پذیرد.



شکل ۵- ساختار نرون دینامیکی با فیدبک سیناپسی محلی.



شکل ۶- ساختار نرون دینامیکی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود.

اولین عملیات، محاسبه جمع وزن دار ورودی‌ها با توجه به فرمول زیر می‌باشد [۲۷]:

$$\varphi(k) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(k) \quad (9)$$

وزن‌ها عملکردی مشابه با آنچه در شبکه‌های پیش‌خورد استاتیکی انجام می‌دادند، خواهند داشت. وزن‌ها به همراه تابع فعال‌ساز مسئولیت تقریب خواص مدل را به عهده دارند. فیلترهای مورد نظر نیز سیستم‌های دینامیکی خطی از مرتبه‌های مختلف هستند که شامل مسیرهای فیدبک و پیش‌خورد وزن دار با وزن‌های به ترتیب  $a_i, i=1, \dots, r$  و  $b_i, i=0, 1, \dots, r$  هستند. رفتار این سیستم را می‌توان توسط رابطه زیر توصیف کرد:

$$z(k) = \sum_{i=0}^r b_i \varphi(k-i) - \sum_{i=1}^r a_i z(k-i) \quad (10)$$

<sup>4</sup> Adaptive Random Search (ARS)

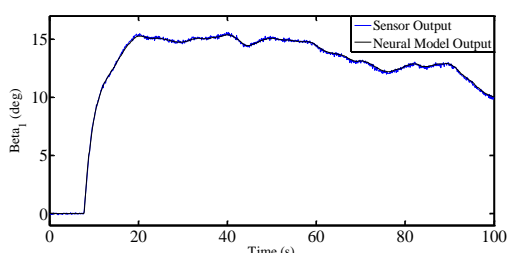
<sup>5</sup> Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA)

<sup>1</sup> Finite Impulse Response (FIR) Filter

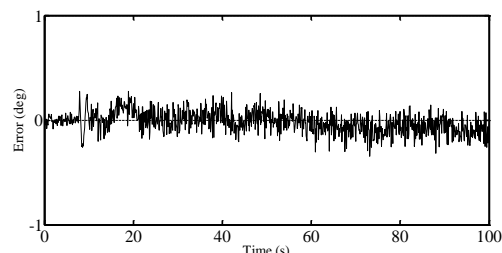
<sup>2</sup> Infinite Impulse Response (IIR) Filter

<sup>3</sup> Extended Dynamic Backpropagation

پارامتر  $K$ ، برابر با ۳۱ می‌باشد که از میانگین تعداد پارامترهای این جدول که عدد ۴۶،۴۴ می‌باشد به مراتب کمتر است. در نتیجه شبکه بازگشتی محلی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود جهت شبیه‌سازی رفتار نرمال سیستم انتخاب گردید. در واقع پس از مقایسه خروجی این مدل عصبی با خروجی واقعی توربین بادی سیگنال مانده تولید می‌شود که توسط آن می‌توان زمان و محل وقوع خطا را تشخیص داد. شکل (۷) نشان‌دهنده مقایسه  $\beta_1$  واقعی و  $\beta_1$  تخمین زده شده توسط شبکه بازگشتی و همچنین خطای تخمین  $\beta_1$  در شرایط عملکرد نرمال می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه و تحت شرایط نرمال: (الف) مقایسه  $\beta_1$  واقعی (خروجی سنسور) و  $\beta_1$  تخمین زده شده و (ب) سیگنال مانده.

همانطور که مشخص است این شبکه به نحو مطلوبی  $\beta_1$  را تخمین می‌زند و خطای تخمین کم و نزدیک به صفر است که برای کاربرد تشخیص خطا مطلوب می‌باشد. شایان ذکر است که شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام گرفت و در آن از حل‌کننده با گام‌های متغیر بهره گرفته شد که اندازه گام ماکزیمم برابر  $10^{-3}$  و اندازه گام مینیمم  $10^{-4}$  انتخاب شدند.

به منظور بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا، برای سیستم فراز چندین نوع خطای مختلف در نظر گرفته شد. خطاهای سیستم فراز بدین صورت دسته‌بندی شدند که افزایش در خروجی سنسور فراز پره ۱ (بایاس

استفاده قرار گرفتند. ابتدا این نمونه‌ها با توجه به مقدار مبنا به مقدار  $p.u.$  تبدیل شده و سپس مقادیر  $p.u.$  داده‌ها برای آموزش استفاده شدند. از آنجائی که دینامیک هر سه پره یکسان در نظر گرفته شده است، سیستم تشخیص خطا برای پره ۱ می‌تواند برای سایر پره‌ها نیز به کار گرفته شود. برای آموزش شبکه‌های عصبی فیدبک سیناپسی محلی با فیلتر FIR و بازگشتی محلی با فیلتر IIR از روش جستجوی تصادفی تطبیقی استفاده شد. این در حالی است که جهت آموزش شبکه‌های بازگشتی المان و جردن از روش پس‌انتشار خطای استاندارد استفاده گردید. جهت انتخاب بهترین شبکه و ساختار، معیارهای مجموع مربعات خطا، اطلاعات آکاپک<sup>۱</sup> و خطای پیش‌بینی نهایی<sup>۲</sup> محاسبه شدند [۲۷]. نتایج مربوط به انتخاب ساختار شبکه و ساختار مناسب برای مدل‌سازی زاویه فراز پره ۱ در جدول ۲ نشان داده شده است. برای هر دو دسته آموزشی و تست، بهترین نتایج در جدول با تغییر رنگ زمینه مشخص شده‌اند. در این جدول  $N_{n,v,s}^m(\Gamma)$  نمایشگر شبکه عصبی دینامیکی  $m$  لایه با  $n$  ورودی،  $v$  نرون مخفی و  $s$  خروجی می‌باشد و نیز  $\Gamma$  مشخص‌کننده مرتبه فیلتر (به استثناء شبکه‌های المان و جردن) به کار برده شده در هر لایه می‌باشد. در شبکه‌های المان و جردن تعداد نرون‌های لایه زمینه به ترتیب با تعداد نرون‌های لایه مخفی و لایه خروجی برابر است. از جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت بهترین شبکه جهت مدل‌سازی رفتار نرمال سیستم، شبکه بازگشتی محلی با فیلتر IIR می‌باشد. اولویت‌های بعدی به ترتیب شبکه‌های عصبی فیدبک سیناپسی محلی با فیلتر FIR، المان و در آخر جردن می‌باشند. با توجه به نتایج جدول، ساختار  $N_{2,3,1}^2(2)$  از شبکه بازگشتی محلی با فیلتر IIR برای مدل‌سازی رفتار  $\beta_1$  در شرایط عملکرد نرمال در نظر گرفته شد. هر نرون در شبکه طراحی شده دارای فیلتر پاسخ ضربه نامحدود مرتبه دوم و تابع فعال‌ساز تانژانت هایپربولیک در خروجی می‌باشد. همانطور که از جدول ۲ مشخص است شبکه بازگشتی محلی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود با ساختار  $N_{2,3,1}^2(2)$  هم در داده‌های آموزشی و هم در داده‌های تست کمترین میزان معیارهای مجموع مربعات خطا، اطلاعات آکاپک و خطای پیش‌بینی نهایی را به خود اختصاص داده است. همچنین تعداد پارامترهای این شبکه عصبی، یعنی

<sup>۲</sup> Final Prediction Error (FPE)<sup>۱</sup> Akaike Information Criterion (AIC)



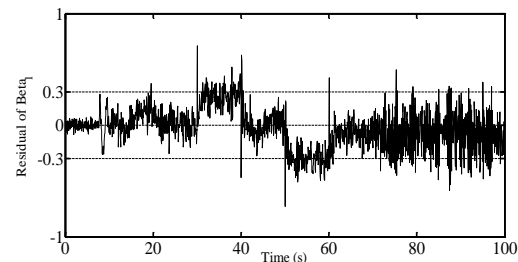
روش کلی قابل دستیابی است:

- روش‌های فعال: در این روش‌ها، مسئله مقاوم بودن از ابتدای رویه طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطا مد نظر قرار می‌گیرد، به نحوی که نسبت به نویز، اغتشاش و عدم قطعیت غیرحساس باشد.
- روش‌های غیرفعال: در این روش‌ها مقاوم‌سازی در بلوک تصمیم‌گیری توسط سطح آستانه تطبیقی<sup>۱</sup> حاصل می‌شود. مزیت روش‌های غیرفعال نسبت به روش‌های فعال در آن است که مقاوم‌سازی طرح علی‌رغم وجود پارامترهای دارای عدم قطعیت در مدل، قابل دستیابی می‌باشد.

جهت جلوگیری از وقوع هشدارهای اشتباه در سیستم تشخیص و جداسازی خطا، باید مقدار سطح آستانه ثابت به دلیل وجود دینامیک‌های مدل نشده، اغتشاش، نویز اندازه‌گیری و عدم قطعیت، به حد کافی بزرگ انتخاب شود. از طرف دیگر انتخاب سطح آستانه ثابت بزرگ منجر به کاهش حساسیت آن خواهد شد. بنابراین همانطور که اشاره شد، در روش‌های غیرفعال استفاده از سطح آستانه تطبیقی پیشنهاد می‌شود. در سطح آستانه تطبیقی، مقدار سطح آستانه با توجه به اطلاعات به دست آمده از سیگنال مانده، در طول زمان تغییر می‌کند. در سیستم فازی پیشنهادی به منظور تولید سطح آستانه تطبیقی، سیگنال‌های مانده و میانگین آن در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و نیز سیگنال حاصل از عبور مانده از یک فیلتر پائین‌گذر به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. با آنالیز این سه سیگنال هم می‌توان وقوع خطا را تشخیص داد و هم آن‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد. بدین صورت که با توجه به شکل (۸) مشخص است که میانگین سیگنال مانده در بازه زمانی وقوع خطای بایاس مثبت افزایش و در بازه زمانی وقوع خطای بایاس منفی کاهش می‌یابد. همچنین در بازه زمانی وقوع خطای محرک فراز تغییر چندانی در میانگین مانده اتفاق نمی‌افتد. اگر مانده از یک فیلتر پائین‌گذر عبور داده شود، نویزهای موجود در آن تا حد مطلوبی حذف شده و تنها فرکانس‌های پائین (نزدیک به صفر) عبور داده می‌شوند. شکل (۹) نشان‌دهنده سیستم فازی پیشنهادی است. خروجی سیستم فازی نیز مشخص‌کننده وقوع و یا عدم وقوع خطا و همچنین نوع خطای به وقوع پیوسته می‌باشد.

مثبت) به عنوان دسته ۱،  $f_1$ ، کاهش در خروجی سنسور فراز پره ۱ (بایاس منفی) به عنوان دسته ۲،  $f_2$  و همچنین خطای مربوط به محرک فراز که با تغییر  $\omega_n$  و  $\omega_n$  مدل می‌شود، به عنوان دسته سوم،  $f_3$ ، در نظر گرفته شدند.

برای بررسی سیگنال مانده در سی‌امین ثانیه خطای بایاس به اندازه  $+0.75$  درجه به مدت ۱۰ ثانیه، در پنجاهمین ثانیه خطای بایاس به اندازه  $-1$  درجه به مدت ۱۰ ثانیه و در هفتادمین ثانیه خطای محرک از نوع ناگهانی با تغییر  $\omega_n$  و  $\omega_n$  به مدت ۳۰ ثانیه به سیستم فراز اعمال گردید. شکل (۸) نشان‌دهنده سیگنال مانده در این شرایط می‌باشد. همانطور که از شکل (۸) مشخص است تفکیک این سه دسته خطا از یکدیگر دشوار است زیرا می‌توان رفتارهای مشابهی بین دسته ۳ و دسته‌های ۱ و ۲ مشاهده کرد. در واقع با سطح آستانه ثابت می‌توان تنها دو دسته خطای ۱ و ۲ را از یکدیگر تفکیک کرد، در حالی که جداسازی دسته خطای ۳ با سطح آستانه ثابت اشتباه خواهد بود زیرا این دسته در مقاطعی با دسته ۱ و در مقاطع دیگر با دسته ۲ رفتار مشابهی دارد.



شکل ۸- ارزیابی مانده توسط سطح آستانه ثابت برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط وقوع سه دسته خطا در سیستم فراز.

همانطور که مشاهده می‌شود به دلیل حضور اغتشاش، عدم قطعیت و نویز اندازه‌گیری در سیستم‌های عملی، بلوک تصمیم‌گیری می‌تواند نسبت به آن‌ها حساس باشد. عوامل مذکور باعث می‌شوند که مسئله مقاوم بودن در سیستم‌های تشخیص و جداسازی خطا بسیار مهم باشد. مسئله مقاوم بودن در سیستم‌های تشخیص و جداسازی خطا آن است که به طور همزمان هم تعداد هشدارهای اشتباه مینیمم شود و هم حساسیت نسبت به مانده تولید شده افزایش یابد. همانطور که در مرجع [۲۷] شرح داده شده است، مقاوم بودن سیستم‌های تشخیص و جداسازی خطا توسط دو

<sup>۱</sup> Adaptive Threshold

جدول ۲- نتایج آموزش شبکه‌های عصبی دینامیکی مختلف به منظور مدل‌سازی  $\beta_1$ 

نوع شبکه	ساختار شبکه	K	داده‌های آموزشی			داده‌های تست		
			J	ffPE	fAIC	J	ffPE	fAIC
فیلتر سیناپسی محلی (FIR)	$N^2_{2,3,1}(1)$	۲۵	۰/۲۵۲۸	۰/۲۶۵۸	-۱/۳۲۵۲	۰/۲۶۰۱	۰/۲۷۳۴	-۱/۲۹۶۷
	$N^2_{2,6,1}(1)$	۴۹	۰/۰۹۸۱	۰/۱۰۸۲	-۲/۲۲۳۸	۰/۱۴۰۶	۰/۱۵۵۱	-۱/۸۶۳۸
	$N^2_{2,3,1}(2)$	۳۱	۰/۰۴۹۹	۰/۰۵۳۱	-۲/۹۳۵۷	۰/۰۹۲۶	۰/۰۹۸۵	-۲/۳۱۷۵
	$N^2_{2,5,1}(2)$	۵۱	۰/۰۵۱۸	۰/۰۵۷۴	-۲/۸۵۸۴	۰/۰۸۳۵	۰/۰۹۲۵	-۲/۳۸۰۹
	$N^2_{2,7,1}(2)$	۷۱	۰/۱۱۳۷	۰/۱۳۱۱	-۲/۰۳۲۲	۰/۱۵۴۱	۰/۱۷۷۷	-۱/۷۲۸۲
	$N^3_{2,4,2,1}(2-2)$	۶۱	۰/۰۶۲۹	۰/۰۷۱۱	-۲/۶۴۴۲	۰/۱۰۰۴	۰/۱۱۳۴	-۲/۱۷۶۶
بازگشتی محلی با فیلتر IIR	$N^2_{2,3,1}(1)$	۲۵	۰/۲۴۴۷	۰/۲۵۸۳	-۱/۳۵۳۶	۰/۲۵۱۰	۰/۲۵۷۴	-۱/۳۵۷۳
	$N^2_{2,4,1}(1)$	۳۳	۰/۱۰۲۳	۰/۱۰۹۹	-۲/۲۰۸۳	۰/۱۴۷۱	۰/۱۵۲۰	-۱/۸۸۳۶
	$N^2_{2,5,1}(1)$	۴۱	۰/۰۳۹۴	۰/۰۴۳۱	-۳/۱۴۵۱	۰/۰۸۲۱	۰/۰۸۵۵	-۲/۴۵۸۸
	$N^2_{2,6,1}(1)$	۴۹	۰/۰۴۲۲	۰/۰۴۶۵	-۳/۰۶۷۳	۰/۰۹۶۴	۰/۱۰۱۲	-۲/۲۹۰۲
	$N^2_{2,7,1}(1)$	۵۷	۰/۰۵۰۹	۰/۰۵۶۱	-۲/۸۷۹۹	۰/۱۱۵۰	۰/۱۲۰۸	-۲/۱۱۳۸
	$N^2_{2,3,1}(2)$	۳۱	۰/۰۳۰۴	۰/۰۳۲۵	-۳/۴۲۶۱	۰/۰۷۹۳	۰/۰۸۱۸	-۲/۵۰۳۵
	$N^2_{2,4,1}(2)$	۴۱	۰/۰۷۸۱	۰/۰۸۵۴	-۲/۴۶۰۹	۰/۱۰۷۸	۰/۱۱۲۳	-۲/۱۸۶۵
	$N^2_{2,5,1}(2)$	۵۱	۰/۰۴۷۱	۰/۰۵۲۶	-۲/۹۴۵۰	۰/۱۰۳۷	۰/۱۰۹۱	-۲/۲۱۵۳
	$N^2_{2,6,1}(2)$	۶۱	۰/۰۳۴۸	۰/۰۳۸۴	-۳/۲۶۰۱	۰/۰۸۷۳	۰/۰۹۱۷	-۲/۳۸۹۴
	$N^2_{2,7,1}(2)$	۷۱	۰/۰۴۵۷	۰/۰۵۲۷	-۲/۹۴۳۷	۰/۰۷۸۲	۰/۰۹۳۶	-۲/۳۶۸۶
	$N^3_{2,3,2,1}(2-2)$	۵۰	۰/۰۶۴۱	۰/۰۷۱۴	-۲/۶۳۹۰	۰/۰۹۵۲	۰/۱۰۰۱	-۲/۳۰۱۸
	$N^3_{2,4,2,1}(2-2)$	۶۱	۰/۰۳۷۳	۰/۰۴۲۶	-۳/۱۵۶۶	۰/۰۸۴۹	۰/۰۹۰۲	-۲/۴۰۵۳
$N^3_{2,4,3,1}(2-2)$	۷۳	۰/۰۲۸۲	۰/۰۳۲۵	-۳/۴۱۰۳	۰/۱۰۱۲	۰/۱۰۸۹	-۲/۲۱۷۷	
بازگشتی المان	$N^2_{2,3,1}$	۲۲	۰/۲۱۴۵	۰/۲۲۴۲	-۱/۴۹۵۴	۰/۲۴۱۷	۰/۲۵۲۶	-۱/۳۷۶۱
	$N^2_{2,5,1}$	۴۶	۰/۱۴۵۱	۰/۱۵۹۱	-۱/۸۳۸۳	۰/۱۷۰۳	۰/۱۸۶۷	-۱/۶۷۸۲
	$N^3_{2,4,2,1}$	۴۵	۰/۰۶۸۳	۰/۰۷۴۷	-۲/۵۹۳۸	۰/۰۷۹۲	۰/۰۸۶۷	-۲/۴۴۵۸
	$N^3_{2,4,4,2,1}$	۸۱	۰/۰۹۰۲	۰/۱۰۶۱	-۲/۳۴۳۷	۰/۱۱۰۳	۰/۱۲۹۷	-۲/۰۴۲۶
بازگشتی جردن	$N^2_{2,3,1}$	۱۶	۰/۳۰۱۱	۰/۳۱۰۹	-۱/۱۶۸۳	۰/۳۲۸۹	۰/۳۳۹۶	-۱/۰۸۰۰
	$N^2_{2,5,1}$	۲۶	۰/۲۶۵۰	۰/۲۷۹۱	-۱/۲۷۶۰	۰/۲۹۷۴	۰/۳۱۳۳	-۱/۱۶۰۷
	$N^3_{2,4,2,1}$	۳۱	۰/۱۲۲۰	۰/۱۲۹۸	-۲/۰۴۱۷	۰/۱۶۰۰	۰/۱۷۰۲	-۱/۷۷۰۶
	$N^3_{2,4,4,2,1}$	۵۵	۰/۰۷۴۲	۰/۰۸۲۸	-۲/۴۹۱۰	۰/۰۸۸۱	۰/۰۹۸۴	-۲/۳۱۹۳

دوزنقه‌ای انتخاب شدند. فازی‌ساز مثلثی از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\mu_{A_i}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - x^*|}{b}, & |x - x^*| \leq b \\ 0, & |x - x^*| > b \end{cases} \quad (13)$$

که در رابطه فوق  $b$  فاصله محل تقاطع تابع تعلق مثلثی با محور  $x$  تا مرکز آن می‌باشد. به همین ترتیب فازی‌سازهای

برای خروجی از اعداد ثابت بدین صورت استفاده شد که عدد صفر نشان‌دهنده عدم وقوع خطا، عدد یک بیانگر وقوع خطای بایاس مثبت در سنسور فراز، عدد دو نشان‌دهنده وقوع خطای بایاس منفی در سنسور فراز و عدد سه بیانگر وقوع خطا در محرک فراز باشد. از آنجایی که خروجی عددی ثابت می‌باشد از سیستم فازی نوع سوگنو بهره گرفته شد. فازی‌ساز سیستم فازی نیز از نوع فازی‌ساز مثلثی و

معنای وقوع خطا در محرک فراز و NO به معنای عدم وقوع خطا و عملکرد صحیح سیستم می‌باشد. همچنین بلوک دیاگرام کلی سیستم پیشنهادی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. تمامی ۲۷ قانون فازی موجود در پایگاه قوانین فازی نیز در جدول ۳ گردآوری شده است. غیرفازی‌سازی به کار گرفته شده در این تحقیق از نوع میانگین وزن دار انتخاب گردید. این نوع غیرفازی‌سازی، غیرفازی‌سازی سونگو نیز نامیده می‌شود. مقدار صریح خروجی با استفاده از این روش مطابق با رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_{B'_i}(y_i) \cdot \bar{y}^i}{\sum_{i=1}^M \mu_{B'_i}(y_i)} \quad (16)$$

که در رابطه فوق  $\mu_{B'_i}$  الی  $\mu_{B''_i}$  مجموعه‌های فازی خروجی و  $\bar{y}^i$  مرکز مجموعه فازی  $i$ -ام می‌باشند. به منظور بررسی صحت طرح پیشنهادی، سیگنال مانده شکل (۸)، میانگین آن و عبور داده شده آن از فیلتر پائین‌گذر، وارد سیستم فازی شکل (۹) شدند. خروجی سیستم فازی در این حالت به صورت شکل (۱۲) می‌باشد. با توجه به این شکل مشخص است که تشخیص و جداسازی خطاها به نحو بسیار مطلوبی انجام شده است. در شکل (۱۲) خروجی سیستم فازی بین لحظات ۳۰ الی ۴۰ ثانیه برابر با یک (خطای بایاس مثبت)، بین لحظات ۵۰ الی ۶۰ ثانیه برابر با دو (خطای بایاس منفی) و بین لحظات ۷۰ الی ۱۰۰ برابر سه (خطای محرک) شده است. این در حالی است که در مابقی لحظات خروجی برابر صفر (بدون خطا) است. لذا نتیجه حاصل شده عملکرد صحیح و عاری از هشدارهای اشتباه را برای سیستم تشخیص و جداسازی خطای فازی-عصبی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

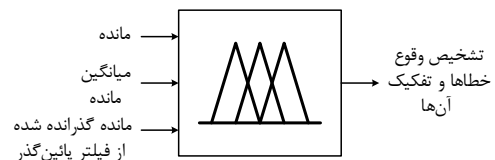
برای بررسی بیشتر عملکرد سیستم ارائه شده، یک تست جامع طبق جدول ۴ انجام پذیرفت. در این تست خطاهای مختلف ایجاد شدند و توانایی سیستم تشخیص و جداسازی خطا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۳) آورده شده است. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، سیستم پیشنهادی، با کمترین اشتباه در تشخیص و جداسازی خطاها، عملکرد بسیار مطلوبی دارد. برای کاهش تعداد تشخیص‌های اشتباه می‌توان محدوده‌های توابع تعلق را تغییر داد؛ اما این تغییر کاهش حساسیت سیستم تشخیص خطا را در پی خواهد داشت.

دورنقه‌ای چپ و راست که نوع خاصی از فازی‌سازی دوزنقه‌ای محسوب می‌شوند را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

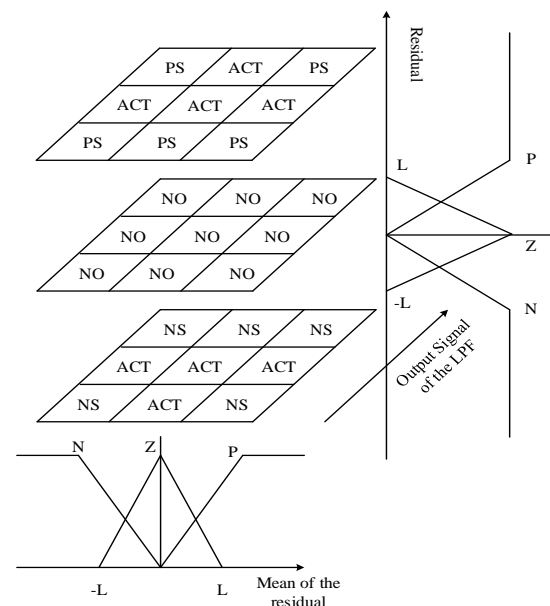
$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 0 & , x > d \\ \frac{d-x}{d-c} & , c \leq x \leq d \\ 1 & , x < c \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{A''}(x) = \begin{cases} 0 & , x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ 1 & , x > b \end{cases} \quad (15)$$

توابع تعلق برای ورودی‌های سیستم فازی به همراه قوانین فازی به کار گرفته شده در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند.

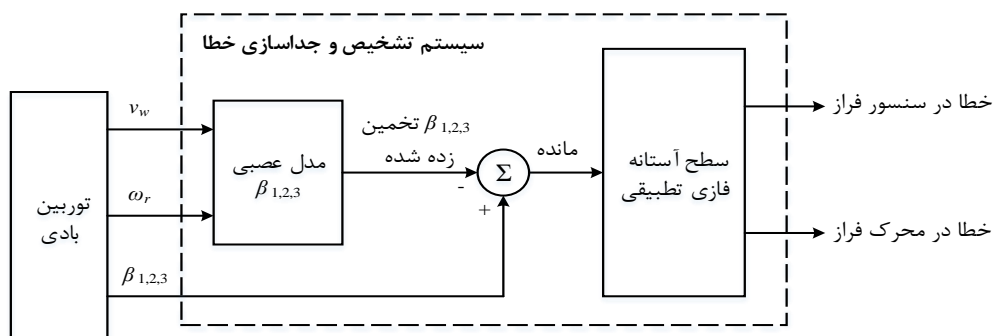


شکل ۹- سیستم فازی پیشنهادی.

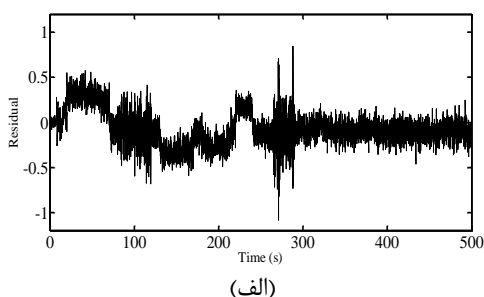


شکل ۱۰- توابع تعلق ورودی‌های سیستم فازی.

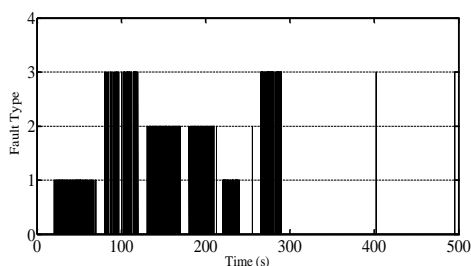
در شکل (۱۰)،  $N$  و  $Z$ ،  $P$  به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مثبت، نزدیک به صفر و منفی می‌باشند. توابع تعلق مقادیر نزدیک به صفر از نوع مثلثی و مابقی توابع تعلق از نوع دوزنقه‌ای در نظر گرفته شدند. همچنین در این شکل PS به معنای وقوع خطای بایاس مثبت در سنسور فراز، NS به معنای وقوع خطای بایاس منفی در سنسور فراز، ACT به



شکل ۱۱- بلوک دیاگرام سیستم تشخیص و جداسازی خطای هوشمند پیشنهادی.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه سطح آستانه فازی در شرایط وقوع سه نوع خطا در سیستم فراز پره ۱: (الف) سیگنال مانده و (ب) تصمیم‌گیری با استفاده از سطح آستانه فازی تطبیقی.

به منظور مقایسه عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا، سه مشخصه مورد استفاده قرار گرفت. این مشخصه‌ها، تعداد هشدارهای اشتباه، تعداد هشدارهای از دست رفته و زمان تشخیص،  $t_{detect}$ ، می‌باشند. جدول (۶) نشان‌دهنده مقایسه نتایج شبیه‌سازی در این حالت می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی صحت عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای فازی تطبیقی را تصدیق می‌کند. همانطور که مشخص است، سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه سطح آستانه فازی از حساسیت خوبی برخوردار است و تعداد هشدارهای اشتباه آن مطلوب و مناسب است. همچنین زمان تشخیص نیز در طرح ارائه شده مطلوب می‌باشد.

### ۵- ارزیابی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای پیشنهادی

در این بخش عملکرد کلی سیستم تشخیص و جداسازی خطای پیشنهادی مورد بررسی آماری قرار می‌گیرد. بدین منظور، عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه سطوح آستانه ثابت، تطبیقی مقاوم و فازی تطبیقی مطابق تست جامع ۲ که در جدول ۵ آورده شده است، مقایسه گردید. شایان ذکر است که سطح آستانه تطبیقی مقاوم طبق روابط زیر تولید می‌شود [۲۹]:

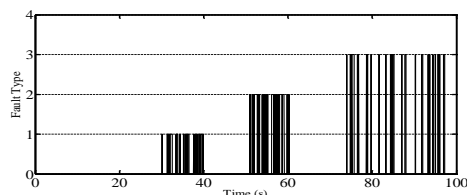
$$T(k) = t_\gamma \bar{v}(k) \pm \bar{m}(k) \quad (17)$$

$$\bar{v}(k) = \eta v(k) + (1-\eta)v(k-1) \quad (18)$$

$$\bar{m}(k) = \eta m(k) + (1-\eta)m(k-1) \quad (19)$$

که در روابط فوق  $v(k)$  و  $m(k)$  به ترتیب واریانس و مقدار میانگین سیگنال مانده برای  $n$  نمونه قبلی هستند. همچنین پارامتر مقدار حرکت است که نزدیک به عدد یک در نظر گرفته می‌شود،  $\gamma$  سطح اهمیت است که به احتمال تجاوز کردن سیگنال مانده از یک مقدار تصادفی، با توزیع گفته می‌شود. رابطه زیر نشان‌دهنده سطح اهمیت می‌باشد:

$$\gamma = P\left(\left|\frac{r-m}{v}\right| > t_\gamma\right) \quad (20)$$



شکل ۱۲- خروجی سیستم تشخیص و جداسازی خطای هوشمند پیشنهادی در شرایط وقوع سه نوع خطا در سیستم فراز پره ۱.

جدول ۴- زمان و محل وقوع خطاها در تست جامع ۱.

پایان	آغاز	نوع خطا	محل وقوع خطا
۷۰	۲۰	بایاس مثبت (f <sub>1</sub> )	سنسور فراز
۱۲۰	۸۰	پوسیدگی پمپ هیدرولیکی (f <sub>3</sub> )	محرک فراز
۱۷۰	۱۳۰	بایاس منفی (f <sub>2</sub> )	سنسور فراز
۲۱۰	۱۸۰	بایاس منفی (f <sub>2</sub> )	سنسور فراز
۲۴۰	۲۲۰	بایاس مثبت (f <sub>1</sub> )	سنسور فراز
۲۹۰	۲۶۵	حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک (f <sub>3</sub> )	محرک فراز
۵۰۰	۳۰۰	-	بدون خطا

در خصوص تعداد هشدارهای اشتباه در طی زمان ۳۰۰ ثانیه، سطوح آستانه ثابت، تطبیقی مقاوم و فازی تطبیقی به ترتیب و در مجموع دارای ۲۹، ۱۳ و ۱۱ هشدار اشتباه می‌باشند؛ این بدان معناست که طرح پیشنهادی در مقایسه با سطح آستانه ثابت تعداد هشدارهای اشتباه را به میزان ۶۲٪ کاهش داده است. همچنین سطح آستانه فازی تطبیقی در مقایسه با سطح آستانه تطبیقی مقاوم تعداد هشدارهای اشتباه را به میزان ۱۵٪ کاهش داده است. در خصوص تعداد هشدارهای از دست رفته در طی زمان ۳۰۰ ثانیه، سطوح آستانه ثابت، تطبیقی مقاوم و فازی تطبیقی به ترتیب و در مجموع دارای ۹۰۷، ۱۶۵ و ۱۵۲ هشدار از دست رفته می‌باشند؛ این بدان معناست که طرح پیشنهادی تعداد هشدارهای از دست رفته را در مقایسه با سطح آستانه ثابت به میزان ۸۳٪ و در مقایسه با سطح آستانه تطبیقی مقاوم به میزان ۸٪ کاهش داده است. مجموع زمان‌های تشخیص نیز در طی زمان ۳۰۰ ثانیه برای سطوح آستانه ثابت، تطبیقی مقاوم و فازی تطبیقی به ترتیب ۲،۵۴ ثانیه، ۱،۷۴ ثانیه و ۱،۲۴ ثانیه می‌باشد؛ این بدان معناست که سطح آستانه فازی تطبیقی مجموع زمان تشخیص را در مقایسه با سطح آستانه ثابت به میزان ۵۱٪ و در مقایسه با سطح آستانه تطبیقی مقاوم به میزان ۲۹٪ کاهش داده است. مقایسه مجموع زمان تشخیص، تعداد کل هشدارهای اشتباه و تعداد کل هشدارهای از دست رفته در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

جدول ۳- تمامی قوانین موجود در پایگاه قوانین فازی.

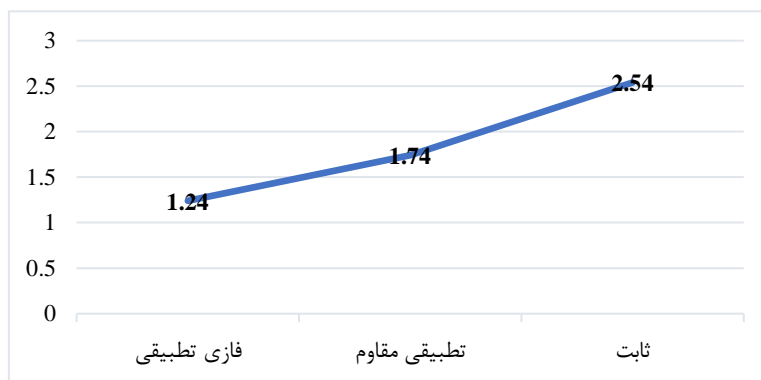
شماره	قانون
1	If (Residual is N) and (Mean is N) and (LPF is N) then (Fault is NS)
2	If (Residual is N) and (Mean is N) and (LPF is Z) then (Fault is ACT)
3	If (Residual is N) and (Mean is N) and (LPF is P) then (Fault is NS)
4	If (Residual is N) and (Mean is Z) and (LPF is N) then (Fault is NS)
5	If (Residual is N) and (Mean is Z) and (LPF is Z) then (Fault is ACT)
6	If (Residual is N) and (Mean is Z) and (LPF is P) then (Fault is ACT)
7	If (Residual is N) and (Mean is P) and (LPF is N) then (Fault is NS)
8	If (Residual is N) and (Mean is P) and (LPF is Z) then (Fault is ACT)
9	If (Residual is N) and (Mean is P) and (LPF is P) then (Fault is NS)
10	If (Residual is Z) and (Mean is N) and (LPF is N) then (Fault is NO)
11	If (Residual is Z) and (Mean is N) and (LPF is Z) then (Fault is NO)
12	If (Residual is Z) and (Mean is N) and (LPF is P) then (Fault is NO)
13	If (Residual is Z) and (Mean is Z) and (LPF is N) then (Fault is NO)
14	If (Residual is Z) and (Mean is Z) and (LPF is Z) then (Fault is NO)
15	If (Residual is Z) and (Mean is Z) and (LPF is P) then (Fault is NO)
16	If (Residual is Z) and (Mean is P) and (LPF is N) then (Fault is NO)
17	If (Residual is Z) and (Mean is P) and (LPF is Z) then (Fault is NO)
18	If (Residual is Z) and (Mean is P) and (LPF is P) then (Fault is NO)
19	If (Residual is P) and (Mean is N) and (LPF is N) then (Fault is PS)
20	If (Residual is P) and (Mean is N) and (LPF is Z) then (Fault is ACT)
21	If (Residual is P) and (Mean is N) and (LPF is P) then (Fault is PS)
22	If (Residual is P) and (Mean is Z) and (LPF is N) then (Fault is ACT)
23	If (Residual is P) and (Mean is Z) and (LPF is Z) then (Fault is ACT)
24	If (Residual is P) and (Mean is Z) and (LPF is P) then (Fault is PS)
25	If (Residual is P) and (Mean is P) and (LPF is N) then (Fault is PS)
26	If (Residual is P) and (Mean is P) and (LPF is Z) then (Fault is ACT)
27	If (Residual is P) and (Mean is P) and (LPF is P) then (Fault is PS)

جدول ۵- زمان و محل وقوع خطاها در تست جامع ۲.

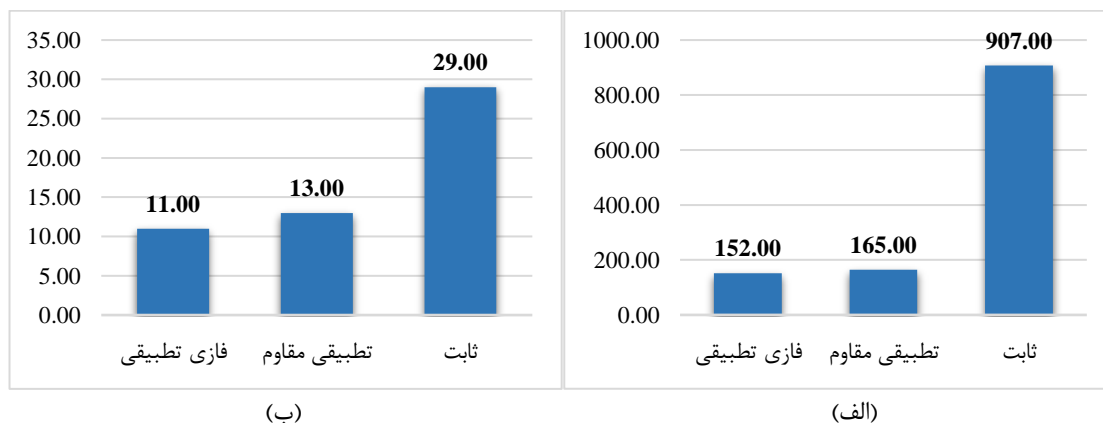
پایان	آغاز	نوع خطا	محل وقوع خطا
۱۲۰	۸۰	حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک ( $f_3$ )	محرک فراز
۱۸۰	۱۶۰	بایاس مثبت ( $f_1$ )	سنسور فراز
۲۶۰	۲۴۰	بایاس منفی ( $f_2$ )	سنسور فراز
۲۹۰	۲۷۰	پوسیدگی پمپ هیدرولیکی ( $f_3$ )	محرک فراز

جدول ۶- ارزیابی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا با سطوح آستانه مختلف.

نوع خطا	تعداد هشدارهای اشتباه			تعداد هشدارهای از دست رفته			$t_{detect}$		
	ثابت	تطبیقی مقاوم	فازی تطبیقی	ثابت	تطبیقی مقاوم	فازی تطبیقی	ثابت	تطبیقی مقاوم	فازی تطبیقی
$f_3$	۹	۳	۳	۳۴۸	۷۴	۶۱	۰/۳۳	۰/۴۱	۰/۲۸
$f_1$	۷	۲	۳	۲۳۵	۴۱	۴۰	۱/۵۰	۰/۶۲	۰/۵۳
$f_2$	۵	۴	۲	۷۹	۱۱	۱۰	۰/۱۴	۰/۳۵	۰/۱۴
$f_3$	۸	۴	۳	۲۴۵	۳۹	۴۱	۰/۵۷	۰/۳۶	۰/۲۹



شکل ۱۴- مقایسه مجموع زمان تشخیص در سه روش مورد مطالعه.



شکل ۱۵- مقایسه عملکرد سه روش مورد مطالعه: الف) تعداد کل هشدارهای از دست رفته و ب) تعداد کل هشدارهای اشتباه.

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، به کمک یک مدل دینامیکی جامع برای توربین‌های بادی، سیستم تشخیص و جداسازی خطایی طراحی شد که توسط آن می‌توان خطاهای به وقوع پیوسته در سیستم فراز را شناسایی کرد. سیستم مذکور از شبکه‌های عصبی دینامیکی برای تشکیل بانکی از مدل‌های عصبی بهره می‌برد. چهار شبکه عصبی دینامیکی شامل فیدبک سیناپسی محلی با فیلتر پاسخ ضربه محدود، بازگشتی محلی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود، بازگشتی المان و بازگشتی جردن مورد بررسی قرار گرفتند و در این بین با توجه به سه معیار مختلف، شبکه بازگشتی محلی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود جهت مدل‌سازی رفتار سیستم انتخاب گردید. تشخیص و جداسازی خطاها بدین صورت انجام پذیرفت که مدل عصبی دینامیکی رفتار نرمال توربین بادی را تقلید نمود و به صورت موازی با آن قرار داده شد. سپس خروجی این مدل عصبی با خروجی واقعی توربین بادی مقایسه شد و بدین ترتیب زمان و محل وقوع خطا شناسایی گردید. برای جداسازی خطاهای سیستم فراز ابتدا سطح آستانه ثابت مورد استفاده قرار گرفت و

محدودیت‌های آن بررسی گردید. سپس برای مقاوم‌سازی طرح ارائه شده، استفاده از سطح آستانه فازی تطبیقی پیشنهاد گردید و نتایج بهره‌گیری از آن طی چند شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت یک بررسی جامع صورت پذیرفت و سطح آستانه فازی تطبیقی با سطوح آستانه ثابت و تطبیقی مقاوم مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه الگوریتم ارائه شده، سریع، دقیق و صحیح عمل می‌کند، نرخ هشدارهای اشتباه آن بسیار کم است و خطاهای تشخیص داده شده را به خوبی جداسازی می‌کند. از روش ارائه شده می‌توان برای تشخیص و جداسازی خطا در سایر قسمت‌های توربین‌های بادی نیز بهره گرفت.

## تقدیر و تشکر

تحقیق فوق برگرفته از طرح پژوهشی «طراحی آستانه فازی تطبیقی جهت جداسازی هوشمند خطاها در توربین‌های بادی» می‌باشد که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری به اجرا در آمده است. بدینوسیله از آن واحد دانشگاهی تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

## مراجع

- [1] F. D. Bianchi, D. H. Battista, and J. R. Mantz, "Wind Turbine Control Systems", Springer, London, 2007.
- [2] A. R. Jha, "Wind Turbine Technology", CRC Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton, Fla, 2011.
- [3] N. Talebi, M. A. Sadrnia, and A. Darabi, "Dynamic Response of Wind Energy Conversion Systems Under Various Faults", International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation, Vol. 7, No. 2, 2015, pp. 80-94.
- [۴] محمدجواد عباسی و حمید یعقوبی، "ارائه یک روش ترکیبی جدید جهت شناسایی خطای قطع تحریک و تمایز آن از نوسان توان در ژنراتور القایی دوسو تغذیه"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۵۹-۱۶۹.
- [۵] مصطفی سرلک و حسن سعیدی، "مدلی هوشمند و زمان-تطبیقی برای شناسایی خطاهای متقارن و نامتقارن در شرایط نوسان توان"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۱، تابستان ۱۳۹۹.
- [6] C. Sloth, T. Esbensen, and J. Stoustrup, "Robust and Fault-Tolerant Linear Parameter-Varying Control of Wind Turbines", Mechatronics, Vol. 21, No. 4, 2011, pp. 645-659.
- [7] B. Dolan, "Wind Turbine Modelling, Control and Fault Detection", PhD's Thesis, Technical University of Denmark, 2010.
- [8] S. M. Tabatabaeipour, P. F. Odgaard, T. Bak, and J. Stoustrup, "Fault Detection of Wind Turbines with Uncertain Parameters: A Set-Membership Approach", Energies, Vol. 5, 2012, pp. 2424-2448.
- [9] A. A. Ozdemir, P. Seiler, and G. J. Balas, "Wind Turbine Fault Detection Using Counter-Based Residual Thresholding", Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Vol. 44, No. 1, 2011, pp. 8289-8294.
- [10] S. Donders, "Fault Detection and Identification for Wind Turbine Systems: A Closed-Loop Analysis", Master's Thesis, University of Twente, 2002.

- [11] A. Kusiak and V. Anoop, "Analyzing Bearing Faults in Wind Turbines: A Data-Mining Approach", *Renewable Energy*, Vol. 48, 2012, pp. 110-116.
- [12] H. Badihi, Y. Zhang, and H. Hong, "Wind Turbine Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Torque Load Control Against Actuator Faults", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 23, No. 4, 2015, pp. 1351-1372.
- [13] E. Alizadeh, N. Meskin, and K. Khorasani, "A Negative Selection Immune System Inspired Methodology for Fault Diagnosis of Wind Turbines", *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 47, No. 11, 2017, pp. 3799-3813.
- [14] M. Entezami, S. Hillmanssen, P. Weston, and M.P. Papaalias, "Fault Detection and Diagnosis within a Wind Turbine Mechanical Braking System Using Condition Monitoring", *Renewable Energy*, Vol. 47, 2012, pp. 175-182.
- [15] W. Teng, H. Cheng, X. Ding, Y. Liu, Z. Ma, and H. Mu, "DNN-Based Approach for Fault Detection in a Direct Drive Wind Turbine", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 10, 2018, pp. 1164-1171.
- [16] P. Qian, D. Zhang, X. Tian, Y. Si, and L. Li, "A Novel Wind Turbine Condition Monitoring Method Based on Cloud Computing", *Renewable Energy*, Vol. 135, 2019, pp. 390-398.
- [17] L. Wenyi, Z. Wang, J. Han, and G. Wang, "Wind Turbine Fault Diagnosis Method Based on Diagonal Spectrum and Clustering Binary Tree SVM", *Renewable Energy*, Vol. 50, 2013, pp. 1-6.
- [18] I. Valente de Bessa, R. M. Palhares, M. F. S. V. D'Angelo, and J. E. C. Filho, "Data-Driven Fault Detection and Isolation Scheme for a Wind Turbine Benchmark", *Renewable Energy*, Vol. 87, Part 1, 2016, pp. 634-645.
- [19] M. Ruiz, L. E. Mujica, S. Alférez, L. Acho, C. Tutivén, Y. Vidal, J. Rodellar, and F. Pozo, "Wind Turbine Fault Detection and Classification by Means of Image Texture Analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 107, 2018, pp. 149-167.
- [20] H. S. Dhiman, D. Deb, S. M. Muyeen, and I. Kamwa, "Wind Turbine Gearbox Anomaly Detection based on Adaptive Threshold and Twin Support Vector Machines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 36, No. 4, 2021, pp. 1-8.
- [21] Y. Cui, P. Bangalore, and L. B. Tjernberg, "A Fault Detection Framework Using Recurrent Neural Networks for Condition Monitoring of Wind Turbines", *Wind Energy*, Vol. 24, No. 11, 2021, pp. 1-14.
- [22] N. F. Fadzail, and S. Mat Zali, "Fault Detection and Classification in Wind Turbine by Using Artificial Neural Network", *International Journal of Power Electronics and Drive System*, Vol. 10, No. 3, 2019, pp. 1687-1693.
- [23] S. Farsoni, S. Simani, and P. Castaldi, "Fuzzy and Neural Network Approaches to Wind Turbine Fault Diagnosis", *Applied Sciences*, Vol 11, No. 11, 2021, pp. 1-15.
- [24] C. Zhang, C. Wen, and J. Liu, "A Deep Neural Network for Wind Turbine Blade Fault Detection", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 12, 2020, pp. 1-9.
- [25] I. Hwang, S. Kim, Y. Kim, and C. E. Seah, "A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 18, No. 3, 2010, pp. 636-653.
- [۲۶] حمید پورباقری، افشین پورتنقی و پیام اشتری، "پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سیال در مخازن هوایی آب با استفاده از شبکه عصبی"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱۳۹-۱۵۰.
- [27] K. Patan, "Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Processes", Vol. 377, Springer, Berlin, 2008.
- [28] P. Frasconi, and M. Gori, "Local Feedback Multilayered Networks", *Neural Computation*, 1992, pp. 120-130.
- [29] N. Talebi, M. A. Sadrnia, and A. Darabi, "Robust Fault Detection of Wind Energy Conversion Systems Based on Dynamic Neural Networks", *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2014, Article ID 580972, 2014, pp. 1-13.